

# BUNDESREPUBLIK DEUTSCHLAND



## Prioritätsbescheinigung über die Einreichung einer Patentanmeldung

Aktenzeichen: 103 15 525.2

Anmeldetag: 04. April 2003

Anmelder/Inhaber: Siemens Aktiengesellschaft, München/DE

Bezeichnung: Steuerverfahren zur rückbegrenzten Geschwindigkeitsführung eines bewegbaren Maschinenelementes einer numerisch gesteuerten industriellen Bearbeitungsmaschine

IPC: G 05 B 19/416

Die angehefteten Stücke sind eine richtige und genaue Wiedergabe der ursprünglichen Unterlagen dieser Patentanmeldung.

München, den 9. Juli 2003  
Deutsches Patent- und Markenamt  
Der Präsident  
Im Auftrag

A handwritten signature in black ink, appearing to read "Faust".

Faust

**Beschreibung**

Steuerverfahren zur rückbegrenzten Geschwindigkeitsführung eines bewegbaren Maschinenelementes einer numerisch gesteuerten industriellen Bearbeitungsmaschine

Die Erfindung bezieht sich auf ein Steuerverfahren zur rückbegrenzten Geschwindigkeitsführung eines bewegbaren Maschinenelementes einer numerisch gesteuerten industriellen Bearbeitungsmaschine wie einer Werkzeugmaschine, Produktionsmaschine oder einem Roboter, wobei eine Bewegungsbahn des Maschinenelementes in unmittelbar aufeinanderfolgende interpolierbare Bewegungsabschnitte aufgelöst ist, wobei bei der Interpolation resultierende Ruckprofile gezielt derart angepasst werden, dass eine filternde Wirkung der Ruckbegrenzung als Bandsperren so beeinflusst wird, dass die Frequenzen der Bandsperren im wesentlichen mit den Eigenfrequenzen des Maschinenelementes und/oder der Maschine oder mit einer Auswahl solcher Eigenfrequenzen zusammenfallen.

Jedes schwingungsfähige, mechanische System (z.B. alle Achsen von Werkzeugmaschinen) ist in der Regel durch mindestens eine Eigenfrequenz gekennzeichnet, die bei einem Bewegungs- bzw. Verfahrvorgang angeregt wird und sich im Lageinstwert bemerkbar macht. Aus diesem Grund ist man bestrebt, die Anregung der Mechanik der Maschine zu vermeiden.

Für die Geschwindigkeitsführung einer numerischen Steuerung, z.B. für eine Werkzeugmaschine, Produktionsmaschine oder einem Roboter, gehört daher heutzutage eine Ruckbegrenzung zum Stand der Technik. Damit soll eine geringere Belastung der einzelnen Achsen einer Maschine erreicht werden, ohne große Nachteile in der Programmbearbeitungszeit zu erhalten.

Mit einer Ruckbegrenzung ist es möglich, den Aufbau der Beschleunigung für einen Bewegungsvorgang so zu verzögern, dass

der Sollwert geglättet und die Mechanik möglichst wenig schwingungsanregend bewegt wird.

- Die Glättungswirkung einer Ruckbegrenzung ist jedoch stark
- 5 vom geforderten Sollwertverlauf abhängig. Messungen und theoretische Untersuchungen haben gezeigt, dass höherfrequente Beschleunigungs- und Bremsvorgänge mit geringerer Dynamik durchgeführt werden müssen, um die schwingungsfähige Mechanik nicht so stark anzuregen. Diese Abhängigkeit gilt sowohl bei
- 10 kurzen Positionierungsvorgängen, als auch z.B. im Bahnsteuerbetrieb der Maschine.

- Derzeit wird als Abhilfe für dieses Problem der Ruck- und Beschleunigungsgrenzwert so niedrig eingestellt, dass auch
- 15 hochfrequente Änderungen der Bahngeschwindigkeit die Schwingungen nicht zu stark anregen. Durch diese geringen eingesetzten Dynamikwerte wird jedoch unerwünschterweise oftmals eine höhere Bahngeschwindigkeit und damit eine kürzere Programmearbeitungszeit verhindert.

- 20 Eine bekannte Methode, um ein Maschinen-schonendes Geschwindigkeitsprofil zu erhalten, ist eine Ruckbegrenzung. In einer Phase 1 wird auf die maximal zulässige Beschleunigung verfahren. In Phase 2 wird konstant weiterbeschleunigt, die Geschwindigkeit nimmt nur noch linear zu. In Phase 3 wird die Beschleunigung wieder abgebaut. Im Folgenden wird mit dem Begriff Beschleunigung immer auch die Möglichkeit einer negativen Beschleunigung eingeschlossen.
- 25

- 30 Am Ende der Phase 3 ist somit eine maximal zulässige Bahngeschwindigkeit erreicht, mit der in einer Phase 4 weiter verfahren wird. In weiteren Phasen 5 bis 7 wird die Geschwindigkeit nun analog abgebaut, so dass die Bahngeschwindigkeit bei Erreichen einer Sollposition Null beträgt. Dazu wird in der
- 35 Phase 5 eine negative Beschleunigung aufgebaut, die in der Phase 6 konstant gehalten wird und in der Phase 7 schließlich wieder zu Null abgebaut wird. Bezuglich der Ruckbelastung ei-

ner Maschine ist die Steigung der Beschleunigung in den Phasen 1, 3, 5 und 7 kritisch. In diesen Phasen weist der Geschwindigkeitsverlauf einen polynominalen Verlauf auf, während in den übrigen Phasen die Geschwindigkeit linear verläuft oder konstant ist.

Bisher setzt sich der zeitliche Verlauf des Rucks  $r(t)$  somit aus konstanten rechteckförmigen Grundformen zusammen. Die Darstellung in FIG 1 zeigt den zeitlichen Verlauf des Rucks  $r(t)$  in Abhängigkeit von Zeiten  $t_r$ ,  $t_a$ , und  $t_v$ , welche die jeweiligen Zeitspannen des Rucks  $r(t)$  für einen beispielhaften Bewegungsvorgangs eines bewegbaren Maschinenelementes angeben. Der Ruck  $r(t)$  ist entweder gleich Null oder gleich seinem zulässigen Maximalwert  $r_0$  mit positivem oder negativem Vorzeichen:  $r(t) \in \{0, +r_0, -r_0\}$ .

Der Verlauf des Rucks  $r(t)$  für eine Bewegungsvorgang bzw. für einen Verfahrvorgang des bewegbaren Maschinenelementes wird im folgenden auch als Ruckprofil  $r(t)$  bezeichnet.

Problematisch dabei ist aber - wie eingangs erwähnt -, dass solche hochdynamischen Beschleunigungs- und Bremsvorgänge entlang der Bewegungsbahn  $x$  des Maschinenelementes in einem bestimmten Frequenzbereich zur Anregung von mechanischen Schwingungen führen können. Die Dynamik dieser Vorgänge sollte daher an die Maschinengegebenheiten angepasst werden.

Aus einer früheren Patentanmeldung (Anmeldeaktezeichen des Deutschen Patent- und Markenamtes: 102 00 680.6) der Anmelderin ist ein Steuerverfahren zur ruckbegrenzten Geschwindigkeitsführung eines bewegbaren Maschinenelementes einer numerisch gesteuerten industriellen Bearbeitungsmaschine bekannt, bei der mit Hilfe einer gezielten Beeinflussung des Ruckprofils bzw. durch Anpassung des Ruckprofils mit Hilfe einer  $\sin^2$ -förmigen Formfunktion eine Verbesserung des Einschwingverhaltens der bewegbaren Maschinenelemente erzielt wird.

Gegenüber dem Stand der Technik wird durch das erfindungsgemäße Steuerverfahren eine neue Vorgehensweise beschrieben, bei der anders als bei den bisher vorgestellten Ansätzen nicht eine spezielle Formfunktion gewählt, sondern anhand der dominierenden Maschineneigenfrequenzen eine optimale Formfunktion berechnet wird. Dadurch wird erreicht, dass bei geforderter Genauigkeit die Maschinendynamik gegenüber den bisherigen Lösungsansätzen wesentlich gesteigert werden kann.

- 10 Aufgabe der vorliegenden Erfindung ist es daher, ein Steuerverfahren anzugeben, dass die Anregung kritischer Resonanzfrequenzen einer Maschine oder eines beweglichen Maschinen-elementes vermeidet.
- 15 Diese Aufgabe wird für ein Verfahren der eingangs genannten Art dadurch gelöst, dass die Anpassung der Ruckprofile durch eine parameterabhängige Formfunktion erzielt wird.

20 Durch die beschriebene gezielte Anpassung des Ruckverlaufs mittels einer parameterabhängigen Formfunktion wird eine Anregung von Resonanzen vermieden. Damit wird unter anderem ermöglicht, die Dynamikgrenzwerte stark zu erhöhen und damit einen Gewinn in der Programmbearbeitungszeit zu erhalten.

25 Wesentliche Vorteile des beschriebenen erfindungsgemäßen Verfahrens bestehen unter anderem darin:

30 Eine gegenüber dem Stand der Technik wesentlich kleinere Schwingungsanregung beim Verfahren des gleichen Weges in der gleichen Zeit zu gewährleisten.

Eine gegenüber dem Stand der Technik schnelleres Verfahren des Maschinenelementes bei gleicher Schwingungsanregung zu ermöglichen.

Für Werkzeugmaschinen, Produktionsmaschinen oder Roboter bedeutet das wesentlich weichere Verfahren, höhere Genauigkeit z.B. bei der Oberflächenbearbeitung, sowie bessere Qualität.

- 5 Für Werkzeugmaschinen, Produktionsmaschinen oder Roboter bedeutet das schnellere Bearbeiten mit der gleichen Qualität, größere Stückzahl in der gleichen Zeit und größere Effektivität.
- 10 Eine erste vorteilhafte Ausbildung der Erfindung ist dadurch gekennzeichnet, dass zur gezielten Anpassung der Frequenzen der Bandsperren, an die Eigenfrequenzen des Maschinenelementes und/oder der Maschine oder an eine Auswahl solcher Eigenfrequenzen, die Formfunktion mittels Parameter gezielt angepasst werden. Dies ermöglicht eine besonders einfache Anpassung der Frequenzen der Bandsperren an die Eigenfrequenzen der Maschinenelementes und/oder der Maschine oder an eine Auswahl von ihnen.
- 15
- 20 Eine weitere vorteilhafte Ausbildung der Erfindung ist dadurch gekennzeichnet, dass zur gezielten Anpassung der Frequenz einer einzelnen Bandsperre, an eine Eigenfrequenz des Maschinenelementes und/oder der Maschine, die Formfunktion ( $F_s(t, \alpha)$ ) mittels eines einzigen Parameters ( $\alpha$ ) gezielt angepasst wird. Da nur ein einziger Parameter zur Anpassung der Formfunktion benötigt wird, kann eine gezielte Anpassung der Frequenz einer Bandsperre, an die Eigenfrequenz des Maschinenelementes und/oder der Maschine besonders einfach erzielt werden.
- 25
- 30 Wenn die parameterabhängige Formfunktion sich additiv aus einer rechteckförmigen Formfunktion und einer  $\cos^2$ -förmigen oder  $\sin^2$ -förmigen Formfunktion zusammensetzt, kann ein besonders günstiger Verlauf der Formfunktion bzw. des daraus resultierenden Ruckprofils hinsichtlich einer gezielten Anpassung der Frequenz der Bandsperre, an die Eigenfrequenz des Maschinenelementes und/oder der Maschine erzielt werden.

Wenn die parameterabhängige Formfunktion ( $F_s(t, \alpha)$ ) sich additiv aus einer rechteckförmigen Formfunktion ( $F_1(t)$ ) und einer Dirac-Formfunktion ( $F_3(t)$ ) zusammensetzt, kann ein besonders günstiger Verlauf der Formfunktion bzw. des daraus resultierenden Ruckprofils hinsichtlich einer gezielten Anpassung der Frequenz der Bandsperre, an die Eigenfrequenz des Maschinenelementes und/oder der Maschine erzielt werden.

Wenn eine Formänderung des Ruckprofils derart vorgenommen wird, dass die Fläche des Ruckprofils nach der Formänderung der Fläche des Ruckprofils vor der Formänderung bei gleicher Zeit entspricht, wird das Auftreten von Wegverlusten vermieden.

Eine weitere vorteilhafte Ausbildung der Erfindung ist dadurch gekennzeichnet, dass vor Ausführung einer vorgegebenen Bewegungsbahn des Maschinenelementes, zuerst ein entsprechendes optimiertes rechteckförmiges Ruckprofil bestimmt wird, so dass die Frequenzen der Bandsperren im wesentlichen mit den Eigenfrequenzen des Maschinenelementes und/oder der Maschine oder mit einer Auswahl solcher Eigenfrequenzen zusammenfallen und anschließend das bereits optimierte rechteckförmige Ruckprofil durch Anpassung mittels der parameterabhängigen Formfunktion, weiter optimiert wird. Durch diese Vorgehensweise lässt sich ein optimales Gesamtergebnis erzielen, indem alle Möglichkeiten der Optimierung ausgeschöpft werden.

Die Wirkungsweise der Adaption von Ruckprofilen durch eine parameterabhängige Formfunktion sowie weitere Vorteile und Details werden im folgenden anhand eines Ausführungsbeispiels und in Verbindung mit den Figuren verdeutlicht. Dabei zeigen:

FIG 1 Verlauf eines rechteckförmiges Ruckprofils bei einer herkömmlichen Ruckbegrenzung,  
35 FIG 2 ein schwingfähiges System mit ruckbegrenztem Lagesollwert und schwingendem Lageistwert,

FIG 3 den Betragsfrequenzgang der Übertragungsfunktion  
 $A(f)$ , des rückäquivalenten Filters

FIG 4 drei Formfunktionen,

FIG 5 drei Ruckprofile ,

5 FIG 6 den Betragsfrequenzgang der Übertragungsfunktion des  
jeweiligen rückäquivalenten Filters,

FIG 7 drei Einschwingvorgänge und

FIG 8 den Betragsfrequenzgang der jeweiligen Formfunktion.

10 In FIG 1 ist beispielhaft ein rechteckförmiges Ruckprofil  
 $r(t)$  über der Zeit  $t$  dargestellt. Unter einem Ruck wird dabei  
die zeitliche Ableitung der Beschleunigung  $a(t)$  verstanden.  
Das Ruckprofil  $r(t)$  ist einmal durch seine maximale Ruckhöhe  
 $r_0$ , sowie durch die einzelnen Zeiten  $t_r$ ,  $t_a$  und  $t_v$ , die den  
15 Verlauf der Bewegung des bewegbaren Maschinenelementes be-  
schreiben, charakterisiert. Um nach einer Bewegung ein mög-  
lich straffes Einschwingen eines Lageistwertes  $x_{ist}(t)$  eines  
bewegbaren Maschinenelementes zu gewährleisten, wird bei her-  
kömmlichen Steuerverfahren eine sogenannte Ruckbegrenzung  
20 durchgeführt, bei der der maximale Ruck auf einen Wert z.B.  
 $r_0$  begrenzt wird. Eine erste Verbesserung dieser herkömmli-  
chen Ruckbegrenzung wurde bereits in der früheren Patentan-  
meldung der Anmelderin beschrieben, bei der der Verlauf des  
Rucks durch eine  $\sin^2$ -förmige Formfunktion modelliert bzw.  
25 angepasst wurde.

Um die fehlende Wirkung der Ruckbegrenzung systematisch zu  
beschreiben, wird wie in FIG 2 als schwingfähiges System M  
mit ruckbegrenztem Lagesollwert  $x_{soll}(t)$  und schwingendem La-  
geistwert  $x_{ist}(t)$  dargestellt, der Betragsfrequenzgang  $B(f)$   
30 der Übertragungsfunktion  $A(f)$  des rückäquivalentes Filters R  
berechnet. Der Betragsfrequenzgang  $B(f)$  der Übertragungsfunk-  
tion  $A(f)$  des rückäquivalentes Filters R kann abhängig von  
den Begrenzungen (z.B. maximale Geschwindigkeit  $v_0$ , maximale  
Beschleunigung  $a_0$ , maximaler Ruck  $r_0$ ) und dem Verfahrweg bzw.  
35 dem Bewegungsvorgang entlang der Bewegungsbahn x bestimmt  
werden. Der Verlauf des Betragsfrequenzgangs der Übertra-

gungsfunktion  $A(f)$  erlaubt Aussagen über die Anregung des schwingfähigen Systems  $M$  im gesamten Frequenzbereich.

Die filternde Wirkung der Ruckbegrenzung wurde im Rahmen der  
 5 Erfindung systematisch analysiert und optimiert. Durch die von der Steuerung vorgegebenen Begrenzungen  $r_0$ ,  $a_0$ ,  $v_0$  ergibt sich für einen beliebigen Eingangslagesollwert  $u_{\text{soll}}(t)$  ein Ausgangslagesollwert  $x_{\text{soll}}(t)$  der z.B. einer Regelung oder Steuerung zur Regelung oder Steuerung der Bewegung bzw. des  
 10 Verfahrvorgangs eines Maschinenelementes zugeführt wird.

Der in FIG 3 beispielhaft dargestellte Betragsfrequenzgang  $B(f)$  der Übertragungsfunktion  $A(f)$  des rückäquivalenten Filters  $R$  ergibt sich durch Division der Fouriertransformierten des Lagesollwertes  $x_{\text{soll}}(t)$  durch die Fouriertransformierte des Eingangslagesollwertes  $u_{\text{soll}}(t)$  und anschließender Betragsbildung. Für ein beliebiges mechanisches System lässt sich so die filternde Wirkung der Ruckbegrenzung bestimmen. Für die Berechnung des Betragsfrequenzgangs  $B(f)$  der Übertragungsfunktion  $A(f)$ , gemäß FIG 3, des rückäquivalenten Filters  $R$  wurde dass in FIG 1 gezeigte Ruckprofil  $r(t)$  dreimal hintereinander integriert und somit der Lagesollwert  $x_{\text{soll}}(t)$  berechnet.

Analysiert man die Ruckbegrenzung mit Hilfe eines solchen rückäquivalenten Filters  $R$ , lassen sich die erfindungsgemäßen systematischen Maßnahmen zur Minimierung der Schwingungsanregung gut nachvollziehen. Die Maßnahmen, die im folgenden beschrieben werden, gehen dabei weit über die bisher einfach gewandte herkömmliche Ruckbegrenzung sowie die Verwendung einer  $\sin^2$ -förmigen Formfunktion hinaus. Von zentraler Bedeutung ist dabei der Ansatz, durch eine parameterabhängige Formänderung des Ruckprofils  $r(t)$  eine geringere Schwingungsanregung der bewegbaren Maschinenelemente, wie z.B. der Werkzeug der Maschine zu erreichen. Eingeführt wird an dieser Stelle eine sogenannte Formfunktion  $F(t)$  mit Hilfe der im

folgenden ein optimiertes Ruckprofil  $r(t)$  gemäß FIG 5 generiert wird.

Die Erfindung beschreibt ein Steuerverfahren, bei dem anders  
5 als bei den bisher vorgestellten Ansätzen nicht eine spezielle Formfunktion  $F(t)$  gewählt, sondern anhand der dominierenden Maschineneigenfrequenzen der Mechanik der Maschine eine optimale Formfunktion  $F(t)$  berechnet wird. Dadurch wird erreicht,  
10 dass bei geforderter Genauigkeit, die Maschinendynamik wesentlich gesteigert werden kann.

Es lässt sich mathematisch nachweisen, dass die Übertragungsfunktion  $A(f)$  eines beliebigen rückäquivalenten Filters  $R$  sich entsprechend der Beziehung

$$15 \quad A(f) = S \cdot [\Im(F(t/t_r))] \cdot [si(\pi t_a f) \cdot si(\pi(t_a + t_v)f)] \cdot e^{-j\pi f(t_r + 2t_a + t_v)} \quad (1)$$

mit

f: Frequenz  
20     $\Im(F(t))$ : Fouriertransformierte der Formfunktion  $F(t)$

$$si(x) = \frac{\sin(x)}{x}$$

e: Eulersche Zahl

j: imaginäre Einheit

25    darstellen lässt, wobei  $t_r$ ,  $t_a$  und  $t_v$  den in FIG 1 dargestellten Zeiten entsprechen. Der Faktor  $S$ , ist der sogenannte Multiplikator der Formfunktion  $F(t/t_r)$  und dient der Anpassung der Amplitude der Formfunktion an die Höhe des Ruckprofils (Normierung der Formfunktion  $F(t/t_r)$ ). Die Zeiten  $t_r$ ,  $t_a$  und  $t_v$  ergeben sich aus den Randbedingungen (Maximalwert von Geschwindigkeit  $v_0$ , maximale Beschleunigung  $a_0$  und maximaler Ruck  $r_0$ ) sowie dem Verfahrweg  $x$ . Ziel ist es nun, das Ruckprofil  $r(t)$  derart zu verändern bzw. anzupassen, dass der Be-  
30 tragsfrequenzgang  $B(f)$  der Übertragungsfunktion  $A(f)$  derart verändert bzw. angepasst wird, dass die Frequenzen der Band-  
35 breite

sperren des Betragesfrequenzgangs  $B(f)$  der Übertagungsfunktion  $A(f)$  des rückäquivalenten Filters  $R$ , im wesentlichen mit den Eigenfrequenzen der Maschinenelemente und/oder der Maschine oder mit einer Auswahl solcher Eigenfrequenzen zusammenfällt und in den betreffenden Frequenzbereichen der Bandsperre eine möglichst hohe Dämpfung erzielt wird.

Ein Verlust der Dynamik soll dabei möglichst nicht auftreten, d.h. die Verfahrzeit bleibt bei großer Genauigkeit gleich.

Der Betragsfrequenzgang  $B(f)$  der Übertragsübertragungsfunktion  $A(f)$  des rückäquivalenten Filters  $R$  lässt sich im wesentlichen, wie Beziehung (1) zeigt anhand der Formfunktion  $F(t/t_r)$  anpassen bzw. adaptieren. Unter Berücksichtigung der relevanten Eigenfrequenzen des schwingfähigen mechanischen Systems lässt sich damit eine Formfunktion  $F(t/t_r)$  berechnen, die aufgrund der Filterwirkung gewährleistet, dass diese Frequenzen nicht angeregt werden. Unter Bandsperren, sind die Frequenzbereiche des Betragsfrequenzgangs  $B(f)$  der Übertagungsfunktion  $A(f)$  des rückäquivalenten Filters  $R$  zu verstehen, bei denen der Betragsfrequenzgang  $B(f)$  der Übertragungsfunktion  $A(f)$  gemäß FIG 3 jeweils spitzenförmig eine hohe Dämpfung aufweist. Dies zeigt sich in der Darstellung gemäß FIG 3 durch talförmige Einkerbungen des Kurvenverlaufs.

Realisieren lässt sich eine solche Anpassung der Formfunktion  $F(t)$  an die Maschineneigenschaften durch eine sogenannte parameterabhängige Formfunktion  $F(t, \alpha)$ , deren Verlauf mittels eines einzigen Parameters  $\alpha$  beeinflusst werden kann. Es sei an dieser Stelle darauf hingewiesen, dass selbstverständlich auch Formfunktionen gewählt werden können, die von mehreren Parametern abhängen.

Die Vorgehensweise wird im folgenden anhand der parameterabhängigen Formfunktion  $F_s(t, \alpha)$  gezeigt, die sich aus der Addition einer rechteckförmigen Formfunktion  $F_1(t)$  und einer  $\cos^2$ -förmigen Formfunktion  $F_2(t)$  ergibt. Der Parameter  $\alpha$  be-

stimmt die Gewichtung der Anteile der beiden Formfunktionen  $F_1(t)$  und  $F_2(t)$ .

- Die rechteckförmige Formfunktion  $F_1(t)$  ist durch die Beziehung 5 (2) gegeben. In FIG 4 ist die rechteckförmige Formfunktion  $F_1(t)$  als Graph 1d graphisch dargestellt.

$$F_1(t) = \prod_{\frac{t_r}{2}}^{\frac{t_r}{2}} \left( \frac{t}{t_r} \right) \quad (2)$$

mit

$$\begin{aligned} \prod_a^b(x) &= 1 \text{ im Intervall zwischen } a \text{ und } b \\ \prod_a^b(x) &= 0 \text{ sonst} \end{aligned}$$

- Die Fouriertransformierte der Formfunktion  $F_1(t)$  ist durch 15 die Beziehung (3) gegeben.

$$\Im(F_1(t)) = \frac{\sin(\pi f t_r)}{\pi f t_r} \quad (3)$$

Der zeitliche Verlauf der  $\cos^2$ -förmigen Formfunktion  $F_2(t)$  ist durch die Beziehung (4) gegeben und wird in FIG 4 durch den Graphen 2d graphisch dargestellt.

$$F_2(t) = 2 \cdot \prod_{\frac{t_r}{2}}^{\frac{t_r}{2}} \left( \frac{t}{t_r} \right) \cdot \cos^2(\pi t / t_r) \quad (4)$$

- 25 Die Fouriertransformierte der Formfunktion  $F_2(t)$  ist durch die Beziehung (5) gegeben.

$$\Im(F_2(t)) = \frac{\sin(\pi f t_r)}{\pi f t_r} \cdot \frac{1}{1 - (f t_r)^2} \quad (5)$$

12

Die beiden Formfunktionen  $F_1(t)$  und  $F_2(t)$  werden nun addiert und jeweils mit einem einzigen Parameter  $\alpha$  gewichtet, wobei die Gewichtung von  $F_1(t)$  durch Multiplikation mit dem Parameter  $\alpha$  und die Gewichtung von  $F_2(t)$  durch Multiplikation mit einem Faktor  $(1-\alpha)$  erfolgt. Es ergibt sich somit die Parameterabhängige Formfunktion  $F_s(t, \alpha)$  entsprechend der Beziehung 5 (6)

$$F_s(t, \alpha) = \alpha \cdot \prod_{\frac{t_r}{2}}^{\frac{t_r}{2}} \left( \frac{t}{t_r} \right) + (1-\alpha) \cdot \prod_{\frac{t_r}{2}}^{\frac{t_r}{2}} \left( \frac{t}{t_r} \right) \cdot \cos^2(\pi t / t_r) \quad (6)$$

Der zeitliche Verlauf der parameterabhängigen Formfunktion  $F_s(t)$  ist in FIG 4 als Graph 3d dargestellt.

Die Fouriertransformierte der parameterabhängigen Formfunktion  $F_s(t, \alpha)$  ist durch die Beziehung 15 (7) gegeben.

$$\Im(F_s(t, \alpha)) = \frac{\sin(\pi f t_r)}{\pi f t_r} \cdot \frac{1 - \alpha(f t_r)^2}{1 - (f t_r)^2} \quad (7)$$

Durch die Addition der beiden Formfunktionen  $F_1(t)$  und  $F_2(t)$  20 und Gewichtung mit dem Parameter  $\alpha$  ergibt sich die parameter-abhängige Formfunktion  $F_s(t, \alpha)$ . Im Betragsfrequenzgang der Fouriertransformierten der parameterabhängigen Formfunktion  $F_s(t, \alpha)$  erhält man eine zusätzliche Nullstelle bei der Frequenz

25

$$f_0 = \frac{1}{\sqrt{\alpha} \cdot t_r} \quad (8)$$

die vom Parameter  $\alpha$  und von der Rückzeit  $t_r$  abhängt. Da die Rückzeit  $t_r$  in der Regel durch den Bewegungs- bzw. Verfahrvorgang vorgegeben ist und nicht beliebig verändert werden kann, ist in den Beziehungen (6) bis (8) die Rückzeit  $t_r$  in der Regel weitgehend vorgegeben und ist somit nicht als unabhängiger vom Anwender frei wählbarer Parameter anzusehen. 30

Der Betrag der Fouriertransformierten der Formfunktion  $F_s(t, \alpha)$  hängt derart vom Parameter  $\alpha$  ab, dass durch Variationen von  $\alpha$  die Nullstelle  $f_0$  sich im gesamten Frequenzbereich verschieben lässt. Mit dem Parameter  $\alpha$  wird somit ein zusätzlicher Freiheitsgrad erzeugt.

Die in FIG 3 dargestellten Bandsperren, wobei unter Bandsperren die Frequenzbereiche zu verstehen sind, bei denen der Betragsfrequenzgang  $B(f)$  der Übertragungsfunktion  $A(f)$  jeweils spitzenförmig eine hohe Dämpfung aufweist, können mit Hilfe des Parameters  $\alpha$  derart verschoben werden, dass die Frequenzen der Bandsperren im wesentlichen mit den Eigenfrequenzen des Maschinenelementes und/oder der Maschine oder mit einer Auswahl solcher Eigenfrequenzen zusammenfallen. Der Parameter  $\alpha$  kann für jedes Verfahrprofil so berechnet werden, dass für eine vorgegebene Frequenz zwischen  $1/t_r$  und unendlich die schwingfähige Mechanik der Maschine bzw. des bewegbaren Maschinenelementes nicht angeregt wird. Damit lassen sich gezielt die Resonanzfrequenzen der Mechanik unterdrücken.

Für  $\alpha = 0$  liegt die Frequenz  $f_0$  im Unendlichen, was der  $\cos^2$ -förmigen Formfunktion  $F_2(t)$  entspricht. Für  $\alpha = 1$  ist die Frequenz  $f_0$  genau  $1/t_r$ , was der rechteckförmigen Formfunktion  $F_1(t)$  entspricht.

Grundsätzlich kann bei dieser Kombination der beiden Formfunktionen mit einem beliebigen Gewichtungsfaktor  $\alpha$  der gesamte Frequenzbereich abgedeckt werden. Im wesentlichen sinnvoll ist aber nur ein Bereich für den Gewichtungsfaktor  $\alpha$  von 0 bis 1. Der Vorteil den Gewichtungsfaktor  $\alpha$  auf 0 bis 1 zu begrenzen liegt in folgenden Punkten:

- Werte der Formfunktion sind immer positiv
- Monotoner Beschleunigungsauf- und -abbau
- Geringere Stromwärmeverluste
- Geringere Leistung, damit kleiner Motor ausreichend

- In FIG 5 sind die mittels Formfunktionen angepassten Ruckprofile 2a und 3a, sowie das ursprüngliche unveränderte rechteckförmige Ruckprofil 1a dargestellt. Das  $\cos^2$ -förmige Ruckprofil 2a wurde dabei mittels der in FIG 4 dargestellte  $\cos^2$ -förmige Formfunktion 2d gemäß Beziehung (4) angepasst. Das parameterabhängige Ruckprofil 3a ist durch Anpassung des rechteckförmigen Ruckprofils 1a mittels der erfindungsgemäßen parameterabhängigen Formfunktion  $F_s(t, \alpha)$  gemäß Beziehung (6), welche in FIG 4 als Graph 3d visualisiert ist, hervorgegangen. Dabei wurde in dem Ausführungsbeispiel der Parameter  $\alpha = 0,345$  gewählt. An dieser Stelle sei bemerkt, dass eine Formänderung eines Ruckprofils  $r(t)$  mittels der parameterabhängigen Formfunktion  $F_s(t, \alpha)$  derart vorgenommen wird, dass die Fläche des Ruckprofils  $r(t)$  nach der Formänderung der Fläche des Ruckprofils  $r(t)$  vor der Formänderung bei gleicher Zeit entspricht. Hierdurch wird erreicht, dass keine Wegverluste auftreten. Die Formfunktion  $F_2(t)$  weist deshalb einen multiplikativen Faktor von „2“ auf.
- FIG 6 zeigt die aus den jeweiligen Ruckprofilen 1a, 2a und 3a gemäß FIG 5 resultierenden Betragsfrequenzgänge der Übertragungsfunktionen des jeweils daraus resultierenden rückwärtigen Filters. Das rechteckförmige Ruckprofil 1a weist den Betragsfrequenzgang 1b, das  $\cos^2$ -förmige Ruckprofil 2a weist den Betragsfrequenzgang 2b und das parameterabhängige Ruckprofil 3a weist den Betragsfrequenzgang 3b auf.

In dem Ausführungsbeispiel beträgt die Resonanzfrequenz der Mechanik der Maschine 24 Hz. Wie sich anhand von FIG 6 leicht ablesen lässt, weist bei 24 Hz, der Betragsfrequenzgang des mittels der parameterabhängigen Formfunktion  $F_s(t, \alpha)$  angepassten Ruckprofils 3a gemäß FIG 5 eine deutlich höhere Dämpfung auf, als die Betragsfrequenzgänge der Ruckprofile 1a und 2a, welche im Falle des Ruckprofils 1a einem rechteckförmigen Ruckprofil, bzw. im Falle des Ruckprofils 1b einem mittels der  $\cos^2$ -förmigen Formfunktion  $F_2(t)$  veränderten Ruckprofil, entsprechen. Folglich wird die Mechanik der Maschine, bezüg-

lich der Resonanzfrequenz von 24 Hz, bei Verwendung eines parameterabhängigen Ruckprofils weniger stark angeregt als bei der Verwendung der  $\cos^2$ -förmigen Ruckprofils oder eines rein rechteckförmigen Ruckprofils, was ein schnelleres und verbessertes Einschwingverhalten des Lageistwerts auf den Lagesollwert als Folge hat.

In FIG 7 ist die Wirkung der Anpassung der Ruckprofile 1a, 2a und 3a entsprechend dem Ausführungsbeispiel gemäß FIG 5 und FIG 6 graphisch dargestellt. Ein bewegbares Maschinenelement z.B. ein Werkzeug, wird in dem Ausführungsbeispiel von der Lageposition 0 auf den Eingangslagesollwert  $u_{\text{soll}}(t) = 40 \text{ mm}$  verfahren. In FIG 7 ist jeweils der Lageistwert  $x_{\text{ist}}(t)$  des bewegbaren Maschinenelementes über der Zeit t aufgetragen. Der Graph 1c gibt dabei den Verlauf des Lageistwerts  $x_{\text{ist}}(t)$  des Maschinenelementes bei Verwendung des rechteckförmigen Ruckprofils 1a gemäß FIG 5 an. Der Graph 2c gibt den Lageistwert des Maschinenelementes bei Verwendung des  $\cos^2$ -förmigen Ruckprofils 2a an und der Graph 3c gibt den Verlauf des Lageistwertes  $x_{\text{ist}}(t)$  des Maschinenelementes bei Verwendung der parameterabhängigen Ruckprofils 3a mit dem Parameter  $\alpha = 0,345$  an. Wie sich anhand von Graph 3c leicht erkennen lässt, schwingt der Lageistwert  $x_{\text{ist}}(t)$  deutlich schneller und besser auf den Eingangslagesollwert  $u_{\text{soll}}(t) = 40 \text{ mm}$  ein, als die in den Graphen 1c und 2c dargestellten Lageistwerte.

Durch die erfindungsgemäße parameterabhängige Formfunktion kann somit bei geforderter Genauigkeit die Maschinendynamik gegenüber dem Stand der Technik wesentlich gesteigert werden.

In FIG 8 sind die Betragsfrequenzgänge der Fouriertransformierten, der zu FIG 5 zugehörigen rechteckförmigen Formfunktion, als Graph 1e, der zugehörigen  $\cos^2$ -förmigen Formfunktion als Graph 2e, und der zugehörigen parameterabhängigen Formfunktion, mit  $\alpha = 0,356$ , als Graph 3e dargestellt. Es ist deutlich zu sehen, dass der Betragsfrequenzgang der parameterabhängigen Formfunktion unter anderem eine Bandsperre

mit hoher Dämpfung in einem Frequenzbereich um 24 Hz aufweist. Die Dämpfung ist in diesem Sperrbereich dabei sehr viel höher als bei dem Betragsfrequenzgang der rechteckförmigen Formfunktion oder der  $\cos^2$ -förmigen Formfunktion. Auch

5 hier zeigt sich die deutliche Verbesserung, die sich durch die Verwendung einer parameterabhängigen Formfunktion im Vergleich zu den aus dem Stand der Technik bekannten rechteckförmigen oder  $\cos^2$ -förmigen Formfunktion erzielen lässt.

10 An dieser Stelle sei bemerkt, dass der Begriff der  $\cos^2$ -förmigen Formfunktion bis auf die Phasenlage identisch ist mit dem Begriff einer  $\sin^2$ -förmigen Formfunktion. Entsprechend könnte die  $\cos^2$ -Funktion in der Beziehung (4) und der Beziehung (6) durch eine  $\sin^2$ -Funktion ersetzt werden.

15 Der in der rechten eckigen Klammer von Beziehung (1) befindliche Teil der Beziehung (1) beschreibt die Abhängigkeit der Übertragungsfunktion  $A(f)$  des rückäquivalenten Filters  $R$ , von den Zeitspannen  $t_a$  und  $t_v$  gemäß FIG 1. Im Rahmen einer Gesamtoptimierung bietet es sich nun an, dass vor Ausführung, der von der Steuerung der Maschine vorgegebenen Bewegungsbahn  $x$  des Maschinenelementes, zuerst ein entsprechendes optimiertes rechteckförmiges Ruckprofil  $r(t)$  bestimmt wird, so dass die Frequenzen der Bandsperren im wesentlichen mit den Eigenfrequenzen des Maschinenelementes und/oder der Maschine oder mit einer Auswahl solcher Eigenfrequenzen zusammenfallen. Die Zeitspannen  $t_a$  und  $t_v$  sind entsprechend so zu bestimmen, dass die obengenannte Bedingung erfüllt wird. Anschließend wird das bereits optimierte rechteckförmige Ruckprofil  $r(t)$  durch

20 Anpassung mittels der parameterabhängigen Formfunktion

25  $F_s(t, \alpha)$ , weiter optimiert.

Alternativ kann sich die parameterabhängige Formfunktion  $F_s(t, \alpha)$  auch additiv aus einer Dirac-Formfunktion  $F_3(t)$  und der rechteckförmigen Formfunktion  $F_1(t)$  zusammensetzen. Grundsätzlich kann auch bei dieser Kombination der beiden Formfunktionen mit einem beliebigen Parameter  $\alpha$  der gesamte Fre-

quenzbereich abgedeckt werden. Im wesentlichen sinnvoll, aus den bereits weiter oben genannten Vorteilen ist aber auch hier nur ein Bereich für den Parameter  $\alpha$  von 0 bis 1.

5 Die Dirac-Formfunktion ( $F_3(t)$ ) ist dabei durch die Beziehung:

$$F_3(t) = \frac{1}{2} \delta\left(t + \frac{t_r}{2}\right) + \frac{1}{2} \delta\left(t - \frac{t_r}{2}\right) \quad (9)$$

10 gegeben und wird in FIG 4 durch den Graphen 4d graphisch dargestellt.

Die Fouriertransformierte der Formfunktion  $F_3(t)$  ist durch die Beziehung (10) gegeben.

15

$$\Im(F_3(t)) = \cos(\pi f t_r) \quad (10)$$

Für die parameterabhängige Formfunktion  $F_s(t, \alpha)$  ergibt sich somit:

20

$$F_s(t, \alpha) = \alpha \cdot \prod_{\frac{t_r}{2}}^{\frac{t_r}{2}} \left( \frac{t}{t_r} \right) + (1-\alpha) \cdot \left( \frac{1}{2} \delta\left(t + \frac{t_r}{2}\right) + \frac{1}{2} \delta\left(t - \frac{t_r}{2}\right) \right) \quad (11)$$

Für die Fouriertransformierte der parameterabhängige Formfunktion  $F_s(t, \alpha)$  ergibt sich:

25

$$\Im(F_s(t, \alpha)) = si(\pi f t_r) \cdot \frac{\alpha \tan(\pi f t_r) + (1-\alpha)\pi f t_r}{\tan(\pi f t_r)} \quad (12)$$

Durch den einzelnen Parameter  $\alpha$  kann im wesentlichen der Frequenzbereich einer einzelnen dem Parameter zugehörigen Bandsperrre gezielt verändert werden. Generell sind aber auch eine parameterabhängige Formfunktion  $F(t, \alpha_i)$ , bei der die Formfunktion von mehreren Parametern  $\alpha_i$  ( $i=1, 2, 3, \dots$ ) ab-

hängt, möglich. Durch gezielte Veränderung von einzelnen Parametern  $\alpha_i$  kann somit der dem jeweiligen Parameter zugehörige Frequenzbereich von unterschiedlichen Bandsperren gezielt beeinflusst werden. Jedem einzelnen Parameter ist somit genau 5 den Frequenzbereich einer Bandsperre zum gezielten Verändern zugeordnet.

Die analytische Bestimmung einer parameterabhängigen Formfunktion  $F(t, \alpha_i)$ , welche von mehreren Parametern  $\alpha_i$  abhängt, 10 wird durchgeführt, indem man verschiedene Basisformfunktionen  $F_i(t)$  wie z.B.  $F_1(t)$ ,  $F_2(t)$  und  $F_3(t)$  entsprechend der Beziehung

$$F(t, \alpha_i) = \sum_i \alpha_i \cdot F_i(t) \quad i=1, 2, 3 \dots \quad (13)$$

15

linear überlagert, wobei wegen der Forderung

$$\int_{-\tau_R/2}^{\tau_R/2} r(\tau) d\tau = 1 \quad (14)$$

20 für die Parameter  $\alpha_i$ 

$$\sum_i \alpha_i = 1 \quad (15)$$

gelten muss. Die Parameter  $\alpha_i$  sind so zu bestimmen, dass im 25 Bereich der Resonanzfrequenzen die Anregung minimal wird. Als Basisformfunktionen werden hierbei die bereits eingeführte rechteckförmige Formfunktion  $F_1(t)$ , die  $\cos^2$ -förmige Formfunktion  $F_2(t)$  und die Dirac-Formfunktion  $F_3(t)$  verwendet. Selbstverständlich könnte aber auch eine dreieckförmige Formfunktion oder eine trapezförmige Formfunktion oder eine diesbezüglich ähnliche Formfunktionen als Basisformfunktion verwendet werden. 30

## Patentansprüche

1. Steuerungsverfahren zur rückbegrenzten Geschwindigkeitsführung (v) eines bewegbaren Maschinenelementes einer numerisch gesteuerten industriellen Bearbeitungsmaschine wie einer Werkzeugmaschine, Produktionsmaschine oder einem Roboter, wobei eine Bewegungsbahn des Maschinenelementes in unmittelbar aufeinanderfolgende interpolierbare Bewegungsabschnitte aufgelöst ist, wobei bei der Interpolation resultierende Ruckprofile ( $r(t)$ ) gezielt derart angepasst werden, dass eine filternde Wirkung der Ruckbegrenzung als Bandsperren so beeinflusst wird, dass die Frequenzen der Bandsperren im wesentlichen mit den Eigenfrequenzen des Maschinenelementes und/oder der Maschine oder mit einer Auswahl solcher Eigenfrequenzen zusammenfallen, dadurch gekennzeichnet, dass die Anpassung der Ruckprofile ( $r(t)$ ) durch eine parameterabhängige Formfunktion ( $F_s(t, \alpha)$ ,  $F_s(t, \alpha_i)$ ) erzielt wird.
2. Steuerverfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass zur gezielten Anpassung der Frequenzen der Bandsperren, an die Eigenfrequenzen des Maschinenelementes und/oder der Maschine oder an eine Auswahl solcher Eigenfrequenzen, die Formfunktion ( $F_s(t, \alpha_i)$ ) mittels Parameter ( $\alpha_i$ ) gezielt angepasst werden.
3. Steuerverfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass zur gezielten Anpassung der Frequenz einer einzelnen Bandsperre, an eine Eigenfrequenz des Maschinenelementes und/oder der Maschine, die Formfunktion ( $F_s(t, \alpha)$ ) mittels eines einzigen Parameters ( $\alpha$ ) gezielt angepasst wird.
4. Steuerverfahren nach Anspruch 3, dadurch gekennzeichnet, dass die parameterabhängige Formfunktion ( $F_s(t, \alpha)$ ) sich additiv aus einer rechteckförmigen

Formfunktion ( $F_1(t)$ ) und einer  $\cos^2$ -förmigen oder  $\sin^2$ -förmigen Formfunktion ( $F_2(t)$ ) zusammensetzt.

5. Steuerverfahren nach Anspruch 3, dadurch gekennzeichnet, dass die parameterabhängige Form-

funktion ( $F_s(t, \alpha)$ ) sich additiv aus einer rechteckförmigen Formfunktion ( $F_1(t)$ ) und einer Dirac-Formfunktion ( $F_3(t)$ ) zusammensetzt.

10 6. Steuerverfahren einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass eine Formänderung des Ruckprofils ( $r(t)$ ) mittels der parameterabhängigen Formfunktion ( $F_s(t, \alpha), F_s(t, \alpha_i)$ ) derart vorgenommen wird, dass die Fläche des Ruckprofils ( $r(t)$ ) nach der Formänderung der Fläche des Ruckprofils ( $r(t)$ ) vor der Formänderung bei gleicher Zeit entspricht.

20 7. Steuerverfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass vor Ausführung einer vorgegebenen Bewegungsbahn ( $x$ ) des Maschinenelementes, zuerst ein entsprechendes optimiertes rechteckförmiges Ruckprofil ( $r(t)$ ) bestimmt wird, so dass die Frequenzen der Bandsperren im wesentlichen mit den Eigenfrequenzen des Maschinenelementes und/oder der Maschine oder mit einer Auswahl solcher Eigenfrequenzen zusammenfallen und anschließend das bereits optimierte rechteckförmige Ruckprofil ( $r(t)$ ) durch Anpassung mittels der parameterabhängigen Formfunktion ( $F_s(t, \alpha), F_s(t, \alpha_i)$ ), weiter optimiert wird.

## Zusammenfassung

Steuerverfahren zur ruckbegrenzten Geschwindigkeitsführung eines bewegbaren Maschinenelementes einer numerisch gesteuerten industriellen Bearbeitungsmaschine

Die Erfindung betrifft ein Steuerungsverfahren zur ruckbegrenzten Geschwindigkeitsführung ( $v$ ) eines bewegbaren Maschinenelementes einer numerisch gesteuerten industriellen Bearbeitungsmaschine wie einer Werkzeugmaschine, Produktionsmaschine oder einem Roboter, wobei eine Bewegungsbahn ( $x$ ) des Maschinenelementes in unmittelbar aufeinanderfolgende interpolierbare Bewegungsabschnitte aufgelöst ist, wobei bei der Interpolation resultierende Ruckprofile ( $r(t)$ ) gezielt derart angepasst werden, dass eine filternde Wirkung der Ruckbegrenzung als Bandsperren so beeinflusst wird, dass die Frequenzen der Bandsperren im wesentlichen mit den Eigenfrequenzen des Maschinenelementes und/oder der Maschine oder mit einer Auswahl solcher Eigenfrequenzen zusammenfallen, wobei die Anpassung der Ruckprofile ( $r(t)$ ) durch eine parameterabhängige Formfunktion ( $F_s(t, \alpha) F_s(t, \alpha_i)$ ) erzielt wird. Das Steuerverfahren ermöglicht somit eine wesentliche Steigerung der Maschinendynamik bei geforderter Genauigkeit.

FIG 2

200302692

1/4

FIG 1

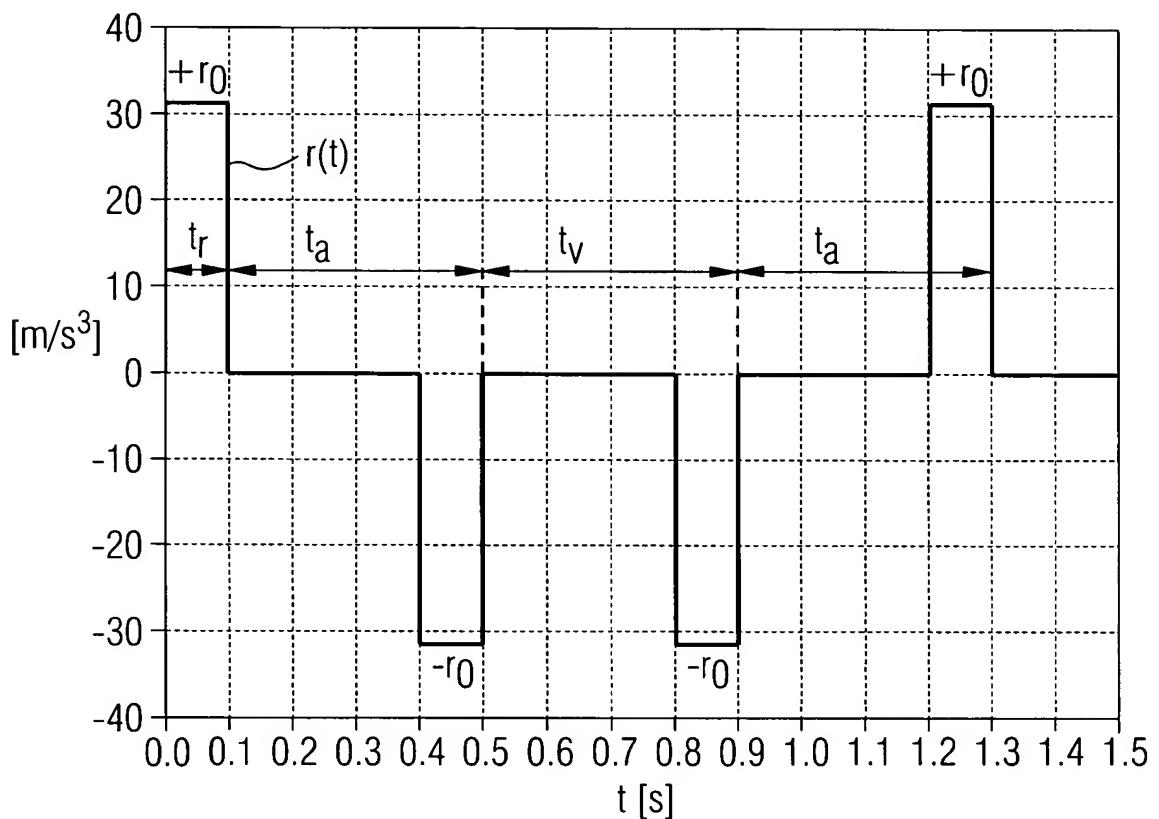
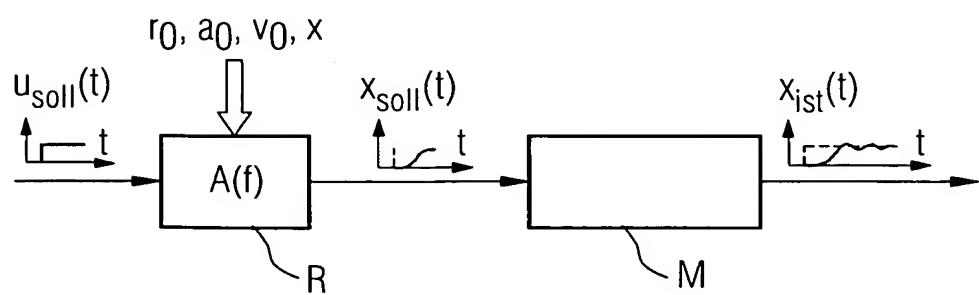


FIG 2



200302692

2/4

FIG 3

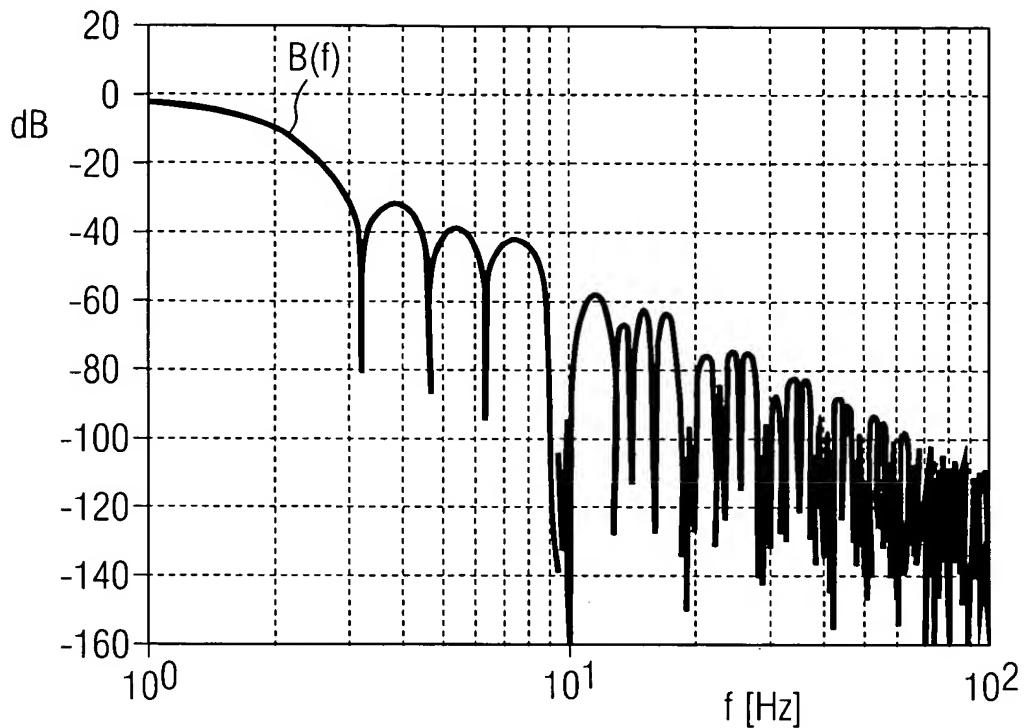
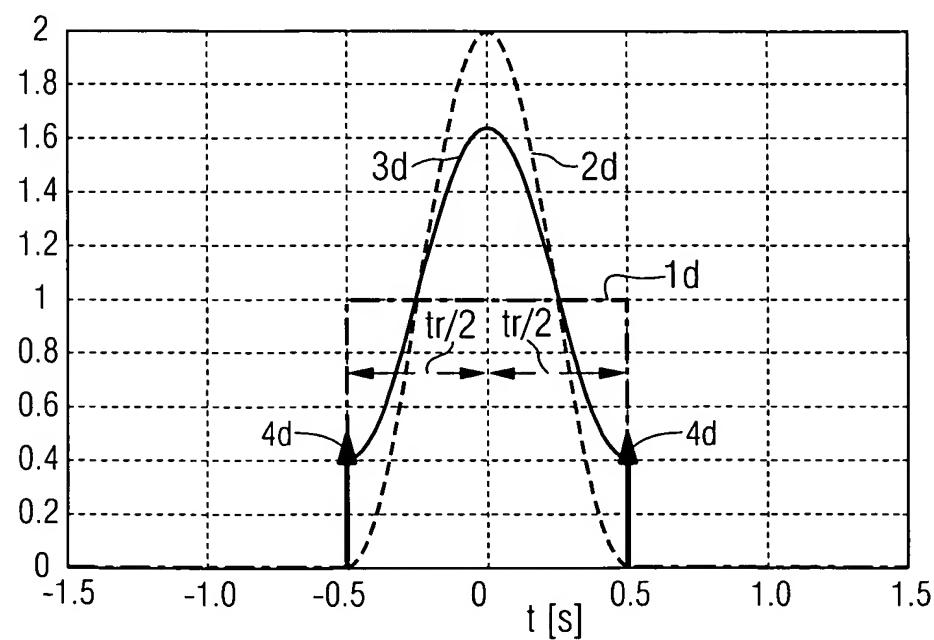


FIG 4



200302692

4/4

FIG 7

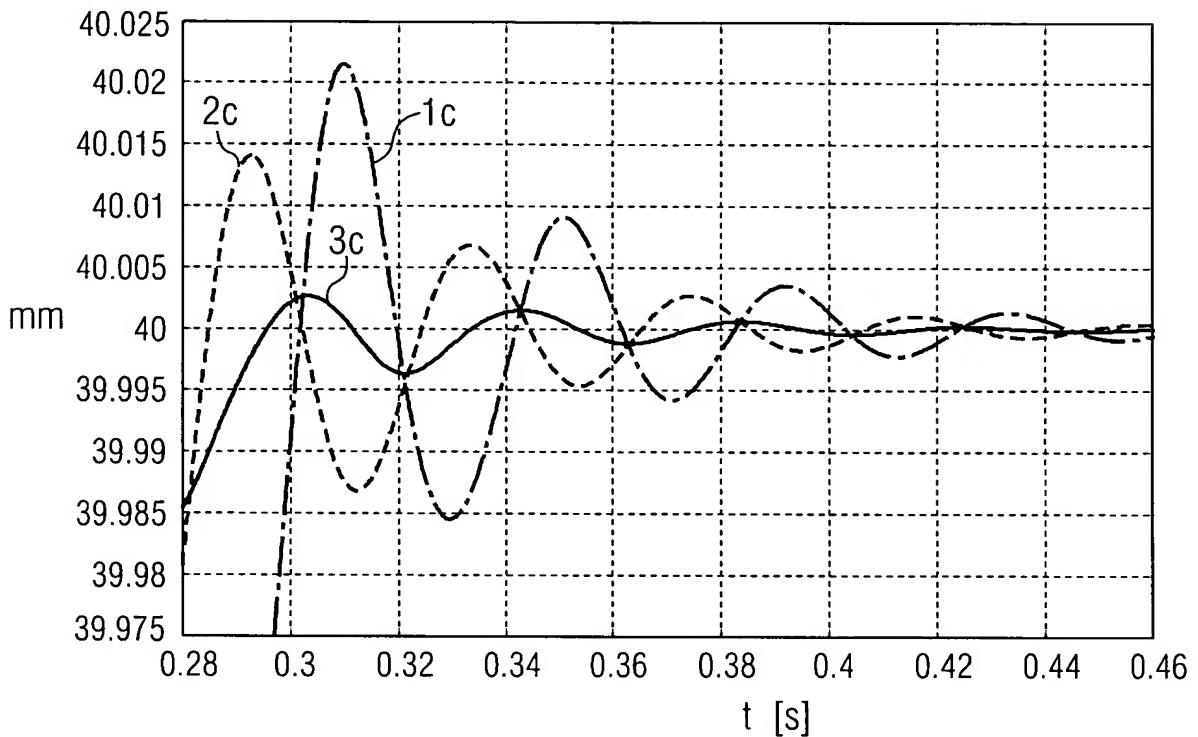
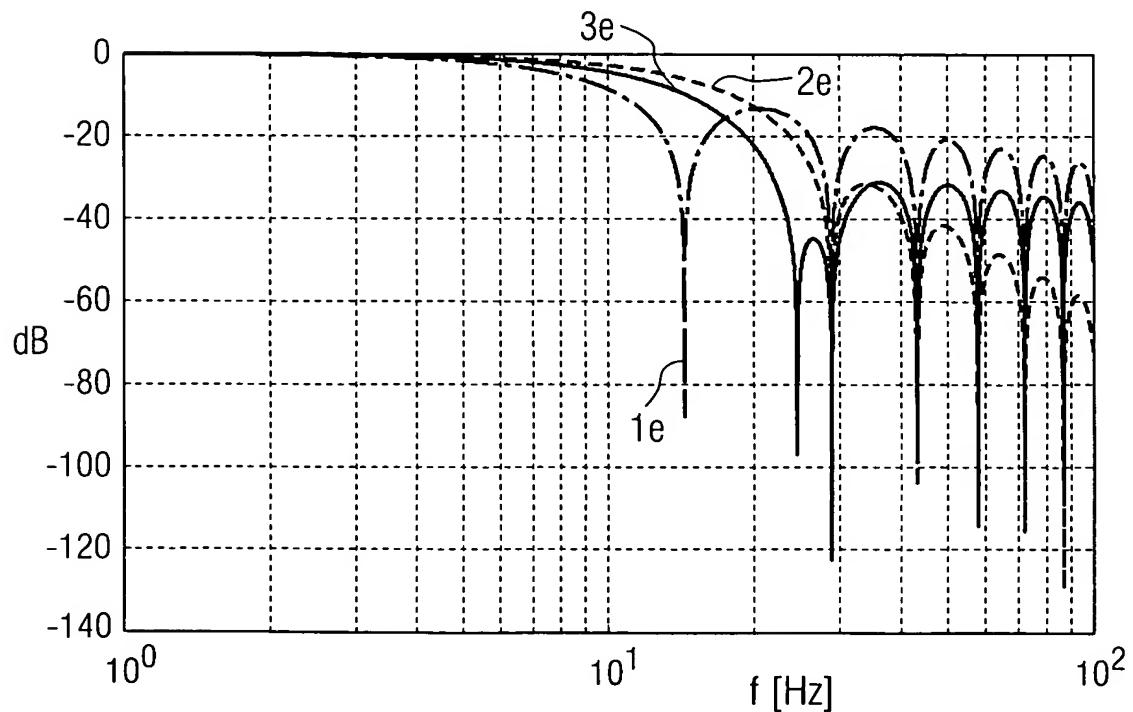


FIG 8





Creation date: 04-07-2004

Indexing Officer: ADAMTEW - ASTER DAMTEW

Team: OIPEScanning

Dossier: 10816801

Legal Date: 04-01-2004

No.	Doccode	Number of pages
1	TRNA	2
2	SPEC	11
3	CLM	6
4	ABST	1
5	DRW	7

Total number of pages: 27

Remarks:

Order of re-scan issued on .....